

0-734575



КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГАЛЯУТДИНОВА Лилия Рашитовна

**СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЕ И ГИДРОДИНАМИКА ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАТОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ  
С ИЗОЛЯЦИЕЙ**

01.02.05. – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ – 2003

Работа выполнена на кафедре аэрогидромеханики  
Казанского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор В.В. Клоков

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ и РТ,  
чл.-корр. АНТ, доктор физ.-мат. наук,  
профессор А.В. Кузнецов

Заслуженный деятель науки РФ и РТ,  
доктор технических наук,  
профессор А.Х. Каримов

Ведущая организация: Казанский государственный технологический  
университет (КХТИ).

Защита состоится "19" июня 2003 г. в 14 час. 30 мин. в аудитории физ. 2 на заседании диссертационного Совета Д 212.081.11 при Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан "19" мая 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент



А.А. Саченков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процесс размерной электрохимической обработки (ЭХРО) используется в авиа-, авто- и приборостроении. Одной из важных **научно-технических** задач является повышение точности размерной электрохимической обработки. Одним из методов достижения этой цели является обработка на малых межэлектродных зазорах. При этом особенно при выборе режимов обработки и выходе на расчетный режим, не исключены короткие замыкания между электродами. Это приводит к порче дорогостоящего катодного инструмента. Одним из методов, гарантирующих исключение короткого замыкания, является нанесение на инструмент диэлектрических покрытий. Особо ответственным является прогнозирование влияния этого нанесения на размерное электрохимическое формообразование и, главным образом, в области **торцевой** рабочей части.

Большое влияние на развитие **исследований** в области ЭХО оказали крупные отечественные и зарубежные ученые, в частности, В.Н. Гусев, Ф.В. Седыкин, И.И. Мороз, Ю.Н. Петров, Л.М. Щербаков, В.П. Смоленцев, А.Х. Каримов, Г.Н. Корчагин, Ю.С. Волков, А.Л. Крылов, Л.Б. Дмитриев, В.И. Филин, В.В. Любимов, А.И. Дикусар, Г.Н. Зайдман, А.Д. Давыдов, В.П. Житников, А.Н. Зайцев, Е.М. Румянцев, Л.М. Котляр, З.Б. Садыков, В.В. Клоков, Е.И. Филатов, К.М. Газизуллин, R.H. Nilson, H. Tipton, J.A. McGeough, J. Kozak, R.C. Hewson-Browne, Y.G Tsuei, H. Rasmussen, M.B. Nanayakara, V.K. Jain, P.C. Pandey, L. Dabrowski и другие.

Процесс размерной электрохимической обработки реализуется при обязательной прокатке электролита в зазоре. Решение проблемы исключения коротких замыканий возможно с использованием в торцевой части катодного инструмента диэлектрической сетки, через которую может подаваться и отбираться электролит. Актуальным при этом является задача описания характера течения электролита.

На практике экранирование катодных поверхностей может осуществляться произвольно при отложении продуктов реакции на катоде.

### **Цель диссертационной работы.**

Разработать метод и методику расчета стационарного электрохимического анодного формообразования и гидродинамики электролита катодом-инструментом с изоляцией на торце, применяемых при изготовлении пазов и резки электродов, для вариантов обработки по схеме **скругления** острых кромок и заточки. Катоды-инструменты могут иметь специальную выступающую диэлектрическую сетку, что приводит к асимметричности характера анодной границы. Разработать программный комплекс для расчета на персональных ЭВМ с возможной реализацией диалогового режима.

**Научная новизна результатов.** Разработаны методы и методики решения задач стационарного электрохимического анодного формообразования катодом-инструментом с изоляцией на торцевой части. Созданы алгоритмы для расчета анодных границ для различных априорных предположениях о характере этих границ. Разработаны методы и методики расчета гидродинамических полей в межэлектродных зазорах для различных схем подачи **электролита**, в том числе через катод-инструмент и диэлектрическую сетку на торце.

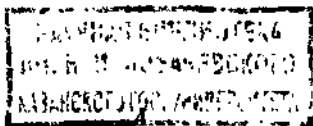
Полученные алгоритмы расчета формообразования и гидродинамики течения полезно использовать при проектировании специальных катодных устройств.

### **На защиту выносятся:**

1. Разработка метода и методики решения задач по расчету симметричного формообразования при стационарной ЭХО катодом-инструментом с изоляцией на торце.

2. Разработка метода и методики решения задачи по расчету асимметричного анодного электрохимического формообразования катодом-инструментом с изоляцией на торце.

3. Разработка метода и методики решения задачи по расчету электрохимического анодного формообразования катодом-инструментом с выступающей сеткой на торце.



4. Разработка метода и методики расчета гидродинамики течения электролита в межэлектродном зазоре при стационарном ЭХО для различных схем подачи **электролита**.

5. Численные расчеты по разработанным методикам и их анализ.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов обеспечиваются применением строгих математических методов при построении **решения**, комплексом мер по проведению внутренних проверок точности вычислений, сравнением с известными теоретическими данными.

**Практическая ценность.** Тема диссертации связана с выполнением плановой темы «Краевые задачи теории электрохимической размерной обработки» № Гос. Регистрации 01910049980, **01960002006**, являющейся частью основного научного направления **КГУ** «Краевые задачи и их приложение». Диссертация выполнялась также в рамках и при поддержке грантов: фундаментальные исследования технологических проблем производства авиакосмической техники (головная организация **МГАТУ** им. К.Э.Циолковского) на тему: «Развитие системы программного обеспечения проектирования катода-инструмента и расчета формообразования размерной электрохимической обработки деталей» (**1996-1997гг.**); гранта АН Республики Татарстан №01-18 на тему: «Математическая модель процесса размерной электрохимической обработки (ЭХО) металлов» (**1998г.**). Разработанные в диссертации методы и полученные результаты могут быть использованы при проектировании специальных катодных устройств для электрохимической обработки металлов. Методы расчета используются при изложении специальных курсов по краевым задачам теории ЭХО и гидродинамики.

**Апробация работы.** Результаты диссертации по мере их получения докладывались и обсуждались на итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (1993, 1996-2003 гг.), на городском научно-методическом семинаре по теоретической механике (г. Казань **1997г.**), на I Международной конференции «Модели механики сплошной **среды**, вычислительной технологии и автоматизированное проектирование в авиа- и **машиностроес-**

нии.» (г. Казань 1997), на Международной научно-технической конференции «Механика машиностроения» (г. **Н.-Челны** 1997), на II Международном научно-практическом семинаре «Современные электрохимические технологии в машиностроении» (г. Иваново 1999), на Международной конференции «Актуальные проблемы математики и механики» (г. Казань 2000), на Молодежной научной школе-конференции «Лобачевские **чтения-2002**» (г. Казань 2002), на Международной **научно-практической** конференции «Наука и практика. Диалоги нового века» (г. Набережные Челны 2003).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на **160** страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 76 названий и приложения. Работа содержит 18 таблиц и 75 рисунков.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность тема диссертационной работы. Дан обзор литературы, изложено содержание работы и сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертации рассматриваются задачи симметричного формообразования и гидродинамики течения электролита при стационарной электрохимической обработке катодом-инструментом с изоляцией на торце.

В первом пункте данного раздела выводится граничное условие стационарности на анодной границе и дается граничное условие на изоляции.

Во втором пункте приводится постановка задачи и дан алгоритм решения задачи двумерного электрохимического формообразования катодом-инструментом с изоляцией на торце. Схема правой симметричной части **межэлектродного зазора (МЭЗ)**, показанная на **рис.1**, характерна для технологической схемы изготовления пазов и резки электродов.

При решении задачи используется ее гидродинамическая интерпретация. Впервые идея решения краевых задач ЭХРО в гидродинамической постановке была предложена учеными Казанского университета **В.В.Клоковым, А.В.Костериным, М.Т.Нужным**. За величину  $V$  принимается скорость безот-

равного фиктивного потока идеальной несжимаемой жидкости, истекающей на участке  $AD$  и  $DC$  из непрерывно расположенных источников.

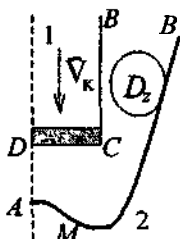


рис. 1. Схема МЭЗ.  
1-катод, 2-анод.

Требуется определить границу области  $D_2$  существования аналитической функции  $W(z) = \varphi + i\psi$ , (где  $\psi$  - потенциал электростатического поля,  $\varphi$  - функция электрического тока) при выполнении следующих граничных условий:  $\psi|_{AMB} = 0$ ;  $\psi|_{BC} = q$  (условия эквипотенциальности границ);  $\varphi|_{DC} = 0$  (условие не протекания тока через изоляцию);

$|dW/dz|_{AMB} = \cos \theta$  (условие стационарности,  $\theta$  - угол наклона касательной к  $AMB$  с осью  $Ox$ ),  $\varphi|_{AD} = 0$  (условие симметрии).

Задача относится к обратным смешанным краевым задачам теории аналитических функций и решается методом годографа. Используя аппарат конформных отображений (формулу Кристоффеля-Шварца), получены следующие параметрические уравнения анодной границы

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{\pi} f(\sqrt{\gamma/t-1}), & 0 < t < 1 \\ y(t) = \frac{2}{\pi} \left[ \sqrt{\gamma-1} [I(t) - J_4] - \frac{1}{1-\gamma} f(\gamma-t) \right], \end{cases}$$

где

$$f(s) = \ln \frac{s + \sqrt{\gamma-1}}{s - \sqrt{\gamma-1}}, \quad I(s) = \int_0^s \frac{\ln[(1-u)/(1+u)]}{\sqrt{\gamma-u^2}(u^2-1)} du,$$

$$J_4 = \int_0^1 \frac{\arctg[2s\sqrt{1-s^2}/(2s^2-1)]}{\sqrt{\gamma+s^2(1-\gamma)}} ds,$$

$\gamma, \nu$  - математические параметры задачи, определяемые по заданной геометрии катода-инструмента. Пример расчета анодных границ представлен на рис.2

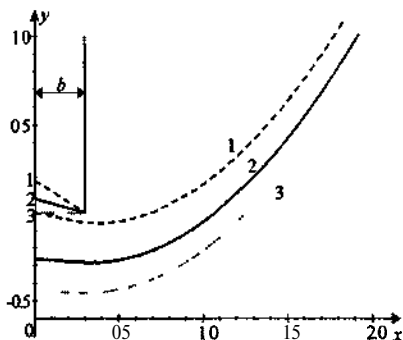


Рис 2 Анодная граница.

$$b = 0.3$$

$$1. l = 0.35, \alpha = 0.172, \alpha\pi \approx 31^\circ,$$

$$2. l = 0.31, \alpha = 0.081, \alpha\pi \approx 14^\circ,$$

$$3. l = 0.3, \alpha = 0.$$

Влияние изоляции проявляется в расположении анодной границы ближе к катоду, по сравнению со случаем отсутствия изоляции

В третьем и четвертом пунктах на основе гипотезы потенциальности электростатических и гидродинамических полей решена гидродинамическая задача методом сопоставления областей изменения комплексных потенциалов электростатического и гидродинамического полей. Комплексный потенциал гидродинамического потока удовлетворяет следующим граничным условиям

$$\Phi_{\Gamma}|_{AD} = 0, \Psi_{\Gamma}|_{AB} = 0, \Psi_{\Gamma}|_{BD} = 1, \text{ где } q - \text{расход жидкости}$$

Параметрические уравнения линий тока получены из выражений для компонент скорости  $V_{\Gamma x}, V_{\Gamma y}$  как траектории движения с помощью равенств

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + V'_{\Gamma x} \Delta t, \\ y_{i+1} = y_i + V'_{\Gamma y} \Delta t, \end{cases}$$

Здесь **комплексно-сопряженная** скорость гидродинамического потока имеет

$$\text{вид } \bar{V}_{\Gamma} = \frac{dW_{\Gamma}}{dz} = \frac{q\pi(1-\nu)}{\sqrt{\gamma-1}} \frac{\sqrt{t-\gamma}}{2\sqrt{t} + (1-\nu)\ln \frac{\sqrt{t}-1}{\sqrt{t}+1}},$$

где  $t$  - вспомогательная комплексная переменная, вещественная и мнимая часть которой находятся из системы двух нелинейных уравнений соответствия точки физической области  $D_z$  и верхней полуплоскости  $D_t$  модифицированным методом **Ньютона**. Приводится алгоритм и примеры расчета линий тока



В пятом пункте решена задача по расчету анодного формообразования при наличии у катода-инструмента излома изоляции. Приведен анализ влияния излома изоляции на анодное формообразование в межэлектродном зазоре.

Во втором разделе диссертации рассматривается решение задачи двумерного стационарного электрохимического формообразования методом годографа для вариантов обработки по схеме **скругления** острых кромок и заточки инструмента. Рассчитывается гидродинамика течения электролита в межэлектродном зазоре для схемы **обтекания**, для схемы подачи электролита через торец **катода-инструмента**, для общей схемы.

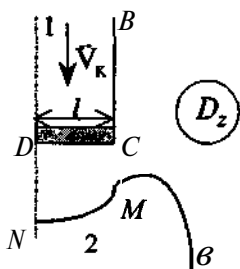


рис. 3. Схема МЭЗ.

В первом пункте данного раздела дан алгоритм решения симметричной задачи по расчету электрохимического формообразования с помощью катода-инструмента, имеющего изоляцию на торце, при априорном характере границы. Схема МЭЗ представлена на рис.3. Комплексный потенциал электростатического поля удовлетворяет таким же граничным условиям, что и в вышерассмотренной задаче.

При решении задачи был учтен двулиственный характер области годографа скорости. Решение задачи осуществляется с помощью выражений:

$$z(t) = \int_0^t \zeta(s) \frac{dW}{ds} ds + y_N, \quad \frac{dW}{dt} = \frac{-i\sqrt{\gamma-1}}{\pi\sqrt{t}\sqrt{t-\gamma}(t-1)}$$

$$\zeta(t) = \frac{2i}{\pi(\mu-3)} \left( 2\sqrt{t} + \frac{3-\mu}{2} \cdot \ln \frac{\sqrt{t}-1}{\sqrt{t}+1} + (1-\mu) \frac{\sqrt{t}}{(1-t)} \right),$$

где  $\zeta = \frac{dz}{dW}$ .

**Параметрические уравнения анодной границы имеют вид:**

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{\pi} \ln \frac{\sqrt{\gamma-t} + \sqrt{t(\gamma-1)}}{\sqrt{\gamma-t} - \sqrt{t(\gamma-1)}}, \\ y(t) = A \cdot \ln \frac{\sqrt{\gamma-t} + \sqrt{\gamma-1}}{\sqrt{\gamma-t} - \sqrt{\gamma-1}} + B \cdot \frac{\sqrt{\gamma-t}}{\sqrt{\gamma-1}(t-1)} + \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\pi^2} [\tilde{I} + 2I_s] - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\gamma-1}, \end{cases}$$

$$A = \frac{-2(2\gamma-1)}{\pi^2(3-\mu)(\gamma-1)} + \frac{1}{\pi^2(\gamma-1)}, \quad B = \frac{-4}{\pi^2(3-\mu)} + \frac{2}{\pi^2}.$$

$$I_s = \int_0^1 \left( \frac{\operatorname{arctg} s}{\sqrt{\gamma+s^2}} + \frac{s \cdot \operatorname{arctg} 1/s}{\sqrt{1+\gamma s^2}} \right) \frac{ds}{(s^2+1)}, \quad \tilde{I} = \int_0^{\sqrt{\gamma}} \frac{\ln \frac{1-u}{1+u}}{(u^2-1)\sqrt{\gamma-u^2}} du.$$

В зависимости от задаваемой ширины катода-инструмента анодная граница имеет как монотонный, так и не монотонный характер.

Во втором пункте решается гидродинамическая задача по нахождению гидродинамического комплексного потенциала  $W_\Gamma$ , удовлетворяющего следующим граничным условиям:

- 1) для схемы обтекания -  $\psi_\Gamma \Pi = 0$ ;  $\psi_\Gamma|_{DCB} = 1$ ;  $\varphi_\Gamma|_{DN} = 0$ ;
- 2) для схемы истечения -  $\psi_\Gamma|_{DNB} = 0$ ;  $\psi_\Gamma|_{CB} = 1$ ;  $\varphi_\Gamma|_{DC} = 0$ ;
- 3) для общей схемы -  $\psi_\Gamma|_{NB} = 0$ ;  $\psi_\Gamma|_{CB} = 1$ ;  $\varphi_\Gamma|_{NDC} = 0$ .

Установлена связь физической области  $D_Z$  и области изменения комплексного потенциала  $W_\Gamma$  гидродинамического потока с помощью равенства:

$$dz = \left[ 2\sqrt{t(s(W_\Gamma))} + (1-\mu^2) \frac{\sqrt{t(s(W_\Gamma))}}{1-t(s(W_\Gamma))} + \frac{3-\mu^2}{2} \ln \frac{\sqrt{t(s(W_\Gamma))}-1}{\sqrt{t(s(W_\Gamma))}+1} \right] \times \\ \times \frac{2}{(3-\mu^2)q} \cdot \frac{dW_\Gamma}{ds} \cdot \cos \left[ \pi \left( i \frac{W_\Gamma}{q} + \frac{1}{2} \right) \right] dW_\Gamma, \quad (1)$$

где функция  $s(W_\Gamma) = \sin \pi \left( i \frac{W_\Gamma}{q} + \frac{1}{2} \right)$  конформно отображает соответствующую полуполосу  $D_{W_\Gamma}$  на соответствующую верхнюю полуплоскость  $D_S$ ,

функция  $t(s)$  - соответствующую верхнюю полуплоскость  $D_S$  на верхнюю полуплоскость  $D_I$ . Пример расчета линий тока и эквипотенциалей представлено на рис.4.

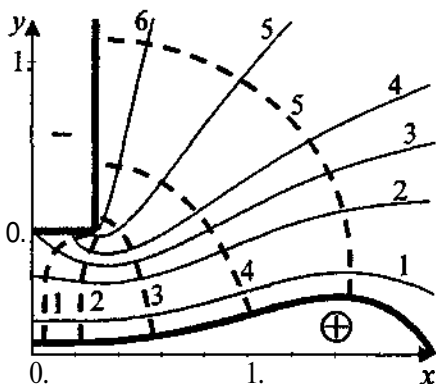


Рис.4 Линии тока и эквипотенциали согласно общей схеме

В третьем пункте приводится метод расчета поля давления и **построения** изобар для вышеуказанных схем истечения электролита в МЭЗ.

Расчет основан на применение интеграла **Бернулли** для идеальной несжимаемой жидкости при пренебрежении силы тяжести.

Исходная формула для построения изобар имеет вид:

$$\frac{1}{V} = \zeta \frac{dW_{\Xi}}{ds} \cdot \frac{ds}{dW_{\Gamma}} = \frac{dz}{dW_{\Gamma}} = R + iI$$

и на линии  $V = const$  выполняется соотношение:

$$V^2 = C^2 = 1/(R^2 + I^2), \quad (2)$$

которое связывает **вещественную** и мнимую части комплексного потенциала  $W_{\Gamma}$  на линии постоянной скорости.

Изобары строились по следующему алгоритму. Сначала методом линейной интерполяции строились линии  $V = const$  в области гидродинамического потенциала  $D_{W_{\Gamma}}$ . Знание диапазона изменения  $\phi, \psi$  в области  $D_{W_{\Gamma}}$  для заданной скорости  $U = const$  позволило найти хорошее начальное приближение для отыскания  $\psi$  по заданному значению  $\phi$  из нелинейного уравнения (2), которое

решается методом половинного деления. Затем по формуле (1) определялись координаты искомой линии  $(x, y)$  в области  $D_Z$ .

Результаты расчета представлены на **рис.5, 6**. Их анализ указывает на наличие зон кавитации для всех схем течения в окрестности угловой точки **ката**-да-инструмента. Отмечается возможность возникновения зон кавитации на анодной границе в случае схемы истечения и общей схемы (рис.6), которым характерны также наличие зоны торможения в **МЭЗ**.

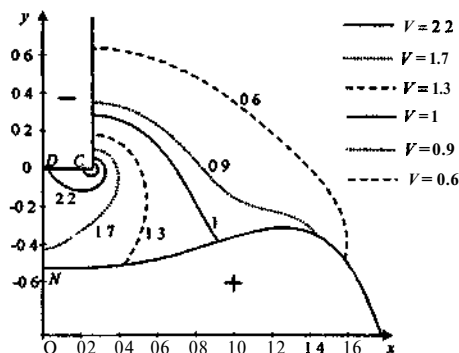


Рис.5. Изобары согласно 1-ой схеме обтекания ( $l/2=0.259$ ).

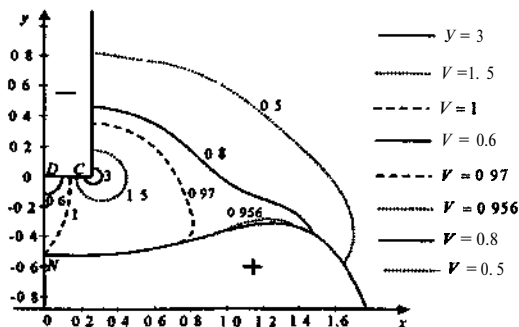


Рис.6 Изобары согласно 3-ей общей схеме ( $l/2=0.259$ ).

В **третьем разделе** диссертации рассматривается решение задачи асимметричного электрохимического формообразования. Приведены результаты

расчета и дан анализ влияния асимметрии зазора на анодное формообразование и гидродинамику течения.

В первом пункте дан алгоритм и выполнен расчет стационарной анодной границы. Схема межэлектродного зазора представлена на рис. 7. Задача решается методом годографа. После преобразования инверсии  $\zeta = \frac{1}{\nu}$  области

комплексно-сопряженной скорости относительно окружности единичного радиуса разрез  $AM_1NM_2B$  в области  $D_\zeta$  будет отличаться от разреза для случая симметричного формообразования только смещением на величину  $m$  вдоль оси  $\zeta_y$ . Исходную задачу можно рассматривать как задачу с переменной зависимостью от  $\theta$  выхода по току, при котором условие стационарности связано равенством

$$V = \frac{\cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\sin \theta + m \cos \theta)^2}}.$$

Тогда решение асимметричной задачи дается следующими формулами

$$\zeta = \bar{\zeta} + im, \quad \frac{dW}{d\tau} = \frac{dW}{d\tau} = \frac{-2i\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\pi\sqrt{\tau^2 - \gamma^2}(\tau^2 - 1)}$$

Параметрические уравнения анодной границы имеют вид:

для участка $NM_2B$	для участка $AM_1N$
$\begin{cases} x(\tau) = \bar{x}(\tau) + x_N \\ y(\tau) = \bar{y}(\tau) + m \cdot \bar{x}(\tau) \end{cases}$	$\begin{cases} x(-\tau) = -\bar{x}(\tau) + x_N \\ y(-\tau) = \bar{y}(\tau) - m \cdot x(\tau) \end{cases}$

где  $\bar{\zeta}, \bar{x}, \bar{y}$  соответствуют симметричному случаю, рассмотренному во втором разделе. Пример расчета анодных границ представлен на рис. 8.

Во втором и третьем пункте дан метод расчета линий тока и эквипотенциалей для трех различных схем течения электролита. В расчетах также использовалось решение симметричной задачи. Приведены результаты расчета и их анализ. Пример результата расчета линий представлен на рис.9.

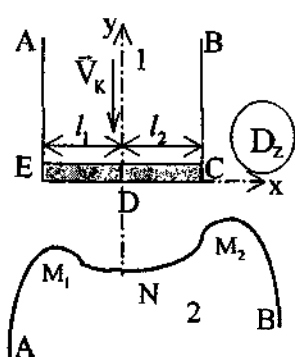


Рис. 7 Схема МЭЗ

1 – катод, 2 – анод

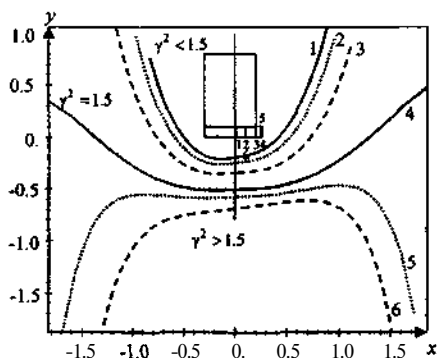


Рис. 8 Анодная граница.

$l_1 = 0.3$ , 1.  $l_2 = 0.01$ , 2.  $l_2 = 0.1$ , 3.  $l_2 = 0.2$ ,  
4.  $l_2 = 0.257$ , 5.  $l_2 = 0.25$ , 6.  $l_2 = 0.2$

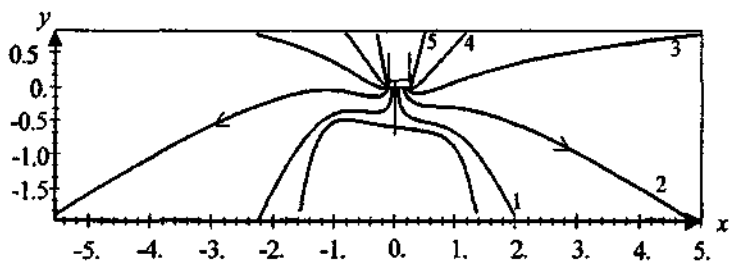


рис.9. Линии тока (схема истечения)  $l_1=0.1$ ,  $l_2=0.25$ .

1.  $\psi = 0.1$ ; 2.  $\psi = 0.3$ ; 3.  $\psi = 0.5$ ; 4.  $\psi = 0.7$ ; 5.  $\psi = 0.9$

В четвертом разделе диссертации рассматривается задача расчета формообразования и гидродинамики течения электролита при стационарной электрохимической обработке катодом-инструментом с выступающей сеткой на торце. Рассматриваются различные два способа подачи электролита в межэлектродный промежуток.

В первом пункте данного раздела приводится алгоритм решения задачи по расчету стационарной анодной границы при ЭХО катодом-инструментом с сеткой на торце. Обобщением предыдущих задач является различная подача напряжения на рабочие поверхности **катода-инструмента**. Схема межэлектродного зазора представлена на рис. 10.

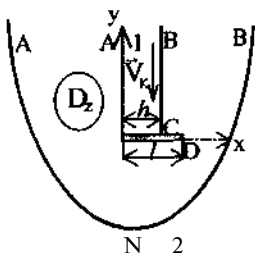


рис. 10 Схема МЭЗ

Комплексный потенциал электростатического поля удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$\begin{aligned} \psi|_{ANB} &= 0; \quad \psi|_{BC} = q = 1; \quad \psi|_{AE} = q_1; \\ \varphi|_{EDC} &= 0; \quad |dW/dz|_{ANB} = \cos \theta. \end{aligned}$$

Задача решена методом годографа скорости. Установлено соответствие между точкой физической области  $D_Z$  и верхней полуплоскости  $D_I$

$$dz = C_2 \cdot f(t) dt, \quad (3)$$

$$\text{где } f(t) = \frac{\ln[(t-1)/(t+1)] - \ln[(e-1)/(e+1)]}{\sqrt{t-\gamma}\sqrt{t-e}(t^2-1)}, \quad C_2 = -2q\sqrt{\gamma+1}\sqrt{-1-e}/\pi^2.$$

Получены следующие параметрические уравнения анодной границы:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{-2q\sqrt{\gamma+1}\sqrt{-1-e}}{\pi} \int_{\eta}^t \frac{ds}{\sqrt{\gamma-s}\sqrt{s-e}(s^2-1)} + x_N, \\ y(t) = \frac{2q\sqrt{\gamma+1}\sqrt{-1-e}}{\pi^2} \int_{\eta}^t \frac{\ln[(1-s)/(s+1)] - \ln[(e-1)/(e+1)]}{\sqrt{\gamma-s}\sqrt{s-e}(s^2-1)} ds + y_N, \end{cases}$$

где  $\gamma, e, \eta$  – математические параметры задачи, определяемые по заданным геометрическим параметрам катода.

$$z_N = \int_e^{\eta} dz = C_2 \int_{\pi}^0 f(t[\theta]) re^{i(\theta+\pi/2)} d\theta = x_N + i \cdot y_N,$$

Приведены примеры расчетов. Дан анализ влияния длины выступа сетки на анодное формообразование. Как показывают результаты расчета, при увеличении длины выступа сетки анодная граница приближается к катоду инструменту со стороны выступа.

Во втором пункте производится расчет гидродинамических линий тока для первой схемы, когда часть электролита отсасывается через диэлектрическую сетку на катоде-инструменте.

В области комплексного потенциала  $D_{W_I}$  решена задача по следующим граничным условиям:

$$\Psi_{\Gamma}|_{AE} = \varphi_2, \Psi_{\Gamma}|_{CB} = \varphi_1, \Psi_{\Gamma}|_{ANB} = 0, \Phi_{\Gamma}|_{EDC} = 0.$$

Производная функции, отображающей верхнюю полуплоскость  $D_t$  на  $D_{W_{\Gamma}}$ , имеет вид

$$\frac{dW_{\Gamma}}{dt} = \frac{C_3}{\sqrt{t-\gamma}\sqrt{t-e}(t^2-1)}, \quad C_3 = -2iq_1\gamma\sqrt{\gamma-1}\cdot\sqrt{1-e}/\pi$$

Согласно определению комплексно-сопряженной гидродинамической скорости

$$\bar{V}_{\Gamma} = \frac{dW_{\Gamma}/dt}{\zeta(t)dW/dz} = \frac{dW_{\Gamma}}{dz}, \text{ получено следующее выражение для вычисления } \bar{V}_{\Gamma}:$$

$$\bar{V}_{\Gamma}(t) = \frac{C_3}{C_1\zeta(t)} = \frac{i\pi \cdot q_{\Gamma}}{\ln \frac{t-1}{t+1} - \ln \frac{e-1}{e+1}} \quad (4)$$

Как видно из рис. 11 для схемы с частичным отсосом, линии тока при протекании через диэлектрическую сетку смещаются.

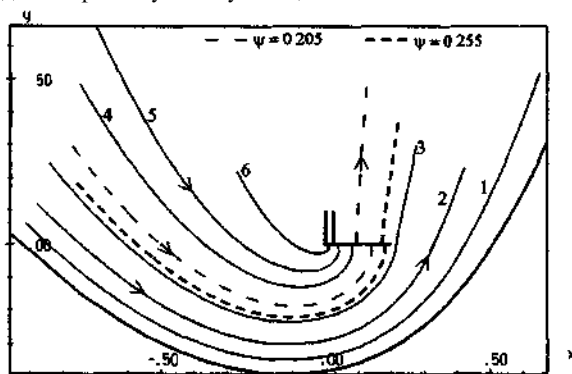


рис. 11 Линии тока для схемы с частичным отсосом,  $q_{II}=0.3$ ;  $h=0.024$ ,  $\psi_D=0.185$ . 1.  $\psi=0.045$ ; 2.  $\psi=0.097$ ; 3.  $\psi=0.181$ ; 4.  $\psi=0.487$ ; 5.  $\psi=0.671$ ; 6.  $\psi=0.978$ .

В третьем пункте разработан метод расчета гидродинамических линий тока для схемы обтекания. Область гидродинамического комплексного потенциала представляет собой полосу шириной  $q_1=1$ . Отображение верхней полуплоскости  $D_t$  на область  $D_{W_{\Gamma}}$  осуществляется при помощи интеграла Кристоффеля Шварца вида



$$W_F(t) = \frac{q}{\pi} \left( \ln \frac{\eta-1}{\eta+1} - \ln \frac{t-1}{t+1} \right).$$

Расчет линий тока производится на основании формулы, связывающей точку в физической плоскости с точкой в области комплексного потенциала

$$dz = C_3 \frac{\ln[(t-1)/(t+1)] - \ln[(e-1)/(e+1)]}{\sqrt{t-\gamma}\sqrt{t-e}} dW_F, \quad (5)$$

где

$$C_3 = \frac{\sqrt{\gamma+1}\sqrt{-e-1}}{\pi}, \quad t(W_F) = \frac{e^{\pi W_F/q + (\eta-1)/(\eta+1)}}{e^{\pi W_F/q - (\eta-1)/(\eta+1)}}.$$

Из формулы (5) получено выражение для комплексно-сопряженной скорости

$$\bar{V}_F = \frac{\pi q_F}{\sqrt{\gamma+1}\sqrt{-e-1}} \cdot \frac{\sqrt{t-\gamma}\sqrt{t-e}}{\ln \frac{t-1}{t+1} - \ln \frac{e-1}{e+1}} \quad (6)$$

Приведены примеры расчетов. Дан их анализ.

В четвертом пункте приводится метод расчета поля давления и построения изобар для двух вышеуказанных схем истечения электролита в МЭЗ. Приведены примеры расчета модуля скорости на торце катода-инструмента и на анодной границе. Дан анализ.

В четвертом пункте в рамках модели турбулентного пограничного слоя разработан алгоритм и выполнен расчет касательных напряжений на анодной границе в зависимости от схем межэлектродного зазора и способа подачи электролита.

В пятом пункте приведен алгоритм расчета гидродинамического воздействия на выступ сетки. Расчет давления жидкости на выступ сетки осуществляется на основе интеграла Бернулли. Прочностные характеристики рассчитываются в рамках теории сопротивления материалов. По этим зависимостям можно выбирать технологические параметры процесса.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

### Основные результаты работы

1. Разработаны метод и методика расчета симметричного электрохимического формообразования катодом-инструментом с изоляцией на торце для технологической схемы изготовления пазов и резки электродов. Выполнен расчет

стационарных анодных границ в случае плоского изолированного торца для различной ширины / катода-инструмента. Изучено влияние излома изоляции на торце катода-инструмента на анодное формообразование. Произведен расчет гидродинамических линий тока. Представлены примеры расчетов, дан их анализ.

2. Исследованы особенности формообразования в стационарном режиме ЭХО симметричным катодом-инструментом с полностью изолированным **торцом** для технологической схемы **скругления** и заточки деталей.

Разработан алгоритм расчета анодной границы и представлены примеры расчетов. Разработан метод расчета гидродинамики течения в межэлектродном зазоре для схемы обтекания, схемы истечения и общей схемы. Построены линии **тока**, **эквипотенциали** и изобары. Проведен анализ областей торможения и больших скоростей потока как зон возможного скопления продуктов реакции и зон кавитации.

3. Разработан метод и методика расчета анодной поверхности, обрабатываемой в стационарном режиме ЭХО с асимметричным формообразованием катодом-инструментом с диэлектрическим покрытием на торце. Отмечен случай возможной новой аппроксимации выхода по току.

Разработан **алгоритм** расчета линий тока в **МЭЗ** для трех различных схем. Изучено влияние асимметричности на анодное формообразование и гидродинамику течения. Приведены результаты расчетов и дан их анализ.

4. Решена задача расчета анодной границы и гидродинамики течения электролита в **МЭЗ** при стационарном ЭХО с использованием катода-инструмента с выступающей диэлектрической сеткой. Произведен расчет анодных границ при различных величинах ширины катода-инструмента и напряжения, подаваемого на различные элементы катода-инструмента.

Разработан алгоритм расчета линий тока в **МЭЗ** и поля скоростей течений электролита для двух схем. Построены гидродинамические линии. Проведен анализ влияния длины сетки на модуль скорости на анодной границе.

Выполнен расчет по влиянию вязких напряжений на анодную границу и напряженного состояния элементов конструкции **КИ**, проведен анализ.

5. Разработан программный комплекс для реализации расчетов по созданным методикам.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Шакирова Л.Р.** Особенности формообразования при ЭХО катодом-инструментом с изоляцией на торце // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. Сб. науч. тр. Тула, 1995, С. 95-100.
2. **Галаяутдинова Л.Р.** Электрохимическое формообразование при скруглении и заточке / Л.Р. **Галаяутдинова**, В.В. Клоков // Модели механики сплошной среды, вычислительной технологии и автоматизированное проектирование в авиа- и машиностроении. I Межд. науч. техн. конф., т.1, Казань, 1997. Казань. 1997. С. 93-96.
3. **Галаяутдинова Л.Р.** Электрохимическое формообразование инструментом с изолированным торцом / Л.Р. **Галаяутдинова**, В.В. Клоков // Механика машиностроения. Межд. науч.-техн. конф. Н.-Челны, 1997г. – Н.-Челны, 1997, С. 30-31.
4. **Галаяутдинова Л.Р.** Особенности стационарного электрохимического формообразования и течения электролита при изоляции рабочего торца катодом-инструмента / Л.Р. **Галаяутдинова**, В.В. Клоков // Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы химии и химической технологии» «Химия-99» и II Международного научно-практического семинара «Современные электрохимические технологии в машиностроении». Иваново. 1999.—С. 16-17.
5. **Галаяутдинова Л.Р.** Асимметричное электрохимическое формообразование и гидродинамика течения при отборе и подаче электролита через катодом-инструмент // Международная конференция «Актуальные проблемы математики и механики» Казань, 2000г. //Труды Математического центра имени Н.И.Лобачевского, Т5–Казань, 2000.— с.266-267.
6. **Галаяутдинова Л.Р.** Особенности анодного формообразования и гидродинамика течения при электрохимическом формообразовании катодом-инструментом с изоляцией на торце. - Казань, 2001.–20с. Рукопись представлена Казан. ун-том. Деп. в ВИНТИ 16 марта 2001, № 669–В2001.
7. **Галаяутдинова Л.Р.** Электрохимическое формообразование и гидродинамика течения катодом-инструментом с сеткой на торце.// Лобачевские чтения-2002 / Международная молодежная научная школа-конференция, Казань 2002г. Тр. математического центра имени Н.И. Лобачевского, т.18–Казань. 2002.– С. 17-18.
8. **Галаяутдинова Л.Р.** Электрохимическое формообразование и гидродинамика

течения электролита с помощью катода-инструмента с сеткой. - Казань, 2003.-33с. Рукопись представлена **Казан.** ун-том. Деп. в ВИНТИ 11 февраля 2003, № 271-В2003.

9. **Галяутдинова** Л.Р. Расчет касательных напряжений на анодной границе при электрохимическом формообразовании. // Наука и практика. Диалоги нового века / Труды международной научно-практической конференции. КамПИ, Н.-Челны, 2003.– Н.-Челны, 2003.–С. 114-116.